

变压吸附空气分离制氧微型化技术研究

卜令兵, 刘应书

(北京科技大学 机械工程学院 气体分离工程研究所, 北京 100083)

摘要: 对压缩机、吸附剂、工艺流程、吸附器结构以及制氧机的结构与外观进行了深入分析, 结果表明, 开发新型节能的微型压缩机, 开发适用于微型制氧机的锂分子筛和节能的工艺流程是变压吸附空分制氧微型化的根本途径, 优化吸附器结构和制氧机的结构与外观是优化微型变压吸附制氧机的重要方法, 是提高制氧机市场竞争力的有效措施。

关键词: 变压吸附; 制氧; 微型化

中图分类号: TQ116.14

文献标识码: A

文章编号: 1007-7804(2006)03-0011-06

Study on Minimizing of PSA Air Separation For Oxygen Generator

BU Ling-bing, LIU Ying-shu

(Institute of Gas Separation Engineering, School of Mechanical Engineering,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the air compressor, the molecular sieve, the flow process, the adsorber structure, the generator structure and appearance are analyzed. The study results show that, it is a fundamental route of minimizing oxygen generator to develop advanced the air compressor, the Li-X molecular sieve and the flow process, it is an important way of optimizing the oxygen generator to optimize the adsorber structure, the generator structure and appearance.

Key Words: Pressure Swing Adsorption (PSA); oxygen generating; minimizing

1 引言

变压吸附 (Pressure Swing Adsorption, 简称 PSA) 空分制氧技术以其能耗低、投资少、规模灵活、自动化程度高等优点, 在中小规模且用氧浓度要求不高的场合具有明显的优势, 并逐步成为中小型空分制氧的主要方法。随着变压吸附制氧技术的不断成熟, 市场的不断扩展, 其应用和研究正在向规模的大型化、微型化及高纯度三个方向发展, 其中微型化是目前变压吸附制氧应用和研究领域中一个非常重要, 并且发展非常迅速的方向。微型变压吸附制氧机与其他小型制氧设备相比具有安全可靠、使用方便、经济实惠及可长期连续供氧等优点, 因此广泛应用于医院、宾馆、氧吧及家庭, 成为医疗保健的主要供氧设备。随着人民生活水平的不断提高, 人们对氧疗保健认识的不断深化, 氧保健将进入普通家庭, 微型变压吸附制氧机将成为普

通的家电产品^[1]。由于微型变压吸附制氧机主要用于家庭, 因此, 如何减小体积、减轻重量成为目前研究的重点。本文在对微型变压吸附制氧机系统分析的基础上, 从压缩机、吸附剂、工艺流程、吸附器结构以及制氧机的结构与外观等方面对变压吸附空分制氧微型化技术进行了深入的研究。

2 微型变压吸附制氧机系统分析

微型变压吸附制氧机的工艺流程如图 1 所示, 空气经过滤后进入压缩机压缩, 压缩后的高压空气经冷却后由电磁阀控制进入吸附器进行吸附分离, 分离得到的一部分产品氧经单向阀进入储气罐, 由减压阀减压后再经流量计、湿化瓶流出供用户使用; 另一部分产品氧对处于解吸状态的吸附器进行反吹清洗; 解吸的氮气经消声器排出。为了满足用户的个性化需求, 有的制氧机设有定时装置、遥控

装置、IC 卡计费装置以及雾化装置等。

根据制氧过程中各部件作用的不同,可以将微型变压吸附制氧机划分为气源系统(包括过滤器、压缩机、冷却器等)、分离系统(包括分子筛、吸附器、干燥剂等)、解吸系统(包括反吹阀、消声器等)、控制系统(包括电磁阀、控制板、控制程序等)、产品系统(包括单向阀、储气罐、减压阀、流量计、湿化瓶等)以及连接与结构系统(包括连接件、支撑件、防护件及外壳)六个功能模块。其中,气源系统为制氧过程提供洁净、高压的非高温气体;分离系统实现氧气与氮气的吸附分离;解吸系统实现废气的排放及吸附床的清洗解吸;控制系统实现两个吸附器的交替、连续运转,并保证制氧系统正常、高效运行;产品系统保证氧气以一定的压力和流量稳定输出,并将氧气湿化,以适宜用户呼吸;连接与结构系统主要连接、支撑、保护各个部件,并起到降低噪声的作用。在这六个模块中,体积最大、重量最重的是压缩机和吸附器,因此,变压吸附制氧机的微型化主要通过减小压缩机和吸附器的体积和重量来实现。

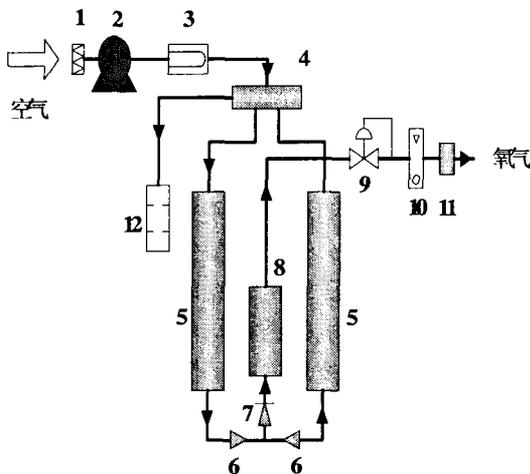


图1 微型变压吸附制氧机工艺流程图

1. 过滤器; 2. 压缩机; 3. 冷却器; 4. 电磁阀;
5. 吸附器; 6. 反吹阀; 7. 单向阀; 8. 储气罐;
9. 减压阀; 10. 流量计; 11. 湿化瓶; 12. 消声器。

3 变压吸附空分制氧微型化技术

3.1 开发新型高效的专用压缩机

目前,国内用于微型变压吸附制氧的小型压缩机主要是遥摆活塞式无油空气压缩机,其主要型号有 ZW250A 型、ZW280A 型、ZW370A 型以及

ZW400A 型,四种压缩机对应的额定功率分别是:250 W、280 W、370 W 及 500 W。图 2 是四种标准型压缩机的排气量随压缩机功率的变化曲线。由图 2 可以看出,随着压缩机功率的增加,排气量变化曲线的斜率逐渐减小,这说明在小功率变化时压缩机的排气量变化较为明显,减小压缩机的功率时,其排气量会迅速下降,即压缩机的微型化难度较大。

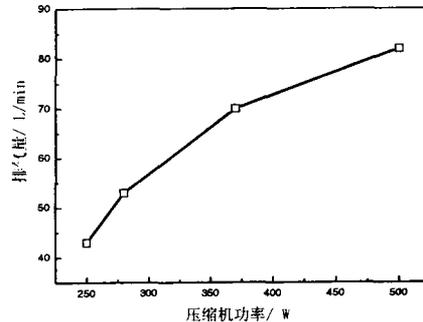


图2 压缩机排气量随功率的变化曲线

随着微型变压吸附制氧技术的进步和新型分子筛的使用,使得微型变压吸附制氧机的空氧比大为降低,同时,由于氧保健市场的逐步成熟,制氧机的产氧量也不需要太高,因此需要开发新的机型。新机型就需要排气量小、能耗低、体积小而排气压力不需要太高的压缩机,从而促进了压缩机技术的进步,促使新型高效压缩机的研制。目前,新研制的 ZW190A (200 W) 型压缩机的排气量为 40 L/min,其性能指标要优于普通的 ZW370A 和 ZW280A,并且其体积和重量大为减小。正在研制的交/直流两用的 100 W 的压缩机排气量将达到 25 L/min,其性能指标将更好,体积更小,为研制便携式制氧机提供了可靠的气源基础。同时,新型的 ZW280 (360 W) 型压缩机流量已经可以达到 75 L/min,新型 ZW400 (520 W) 型压缩机的流量可以达到 98 L/min。可以说,微型变压吸附制氧机市场的逐步成熟,将进一步推动制氧机新产品的开发和压缩机制造技术的进步,压缩机技术的快速发展将给变压吸附制氧机的微型化提供更大的空间。

3.2 开发高效专用吸附剂

吸附剂是变压吸附制氧技术的核心,吸附剂的性能优劣决定着装置的体积、重量及综合性能指标。目前,常用的变压吸附制氧用吸附剂是 5A 沸石分子筛和 13X 沸石分子筛以及基于二者基础之上的改性吸附剂,其中分离性能最好的是新型的 LiX 分子筛^[2-6]。LiX 沸石作吸附剂对氮气的吸附容量比 NaX (13X) 沸石的吸附容量高出 50%,分离

系数从13X的3倍提高到7倍,采用五步循环工艺制氧,制得的氧气浓度在90%以上时,回收率高达70%,制氧能耗降低50%。并且,采用5A沸石或13X沸石作吸附剂时,压力比一般在4以上,而采用LiX沸石,压力比可以降至2左右,从而可以使装置的能耗大为降低。因此,采用吸附容量大、分离系数高、所需压力比小的锂分子筛可以降低空氧比,减少吸附剂用量,从而在很大程度上减小制氧机的重量和体积。然而,目前国内研制并生产的高效锂分子筛主要用于大型装置,由于其颗粒较大,无法用于微型制氧机,因此,国内用于微型制氧机的锂分子筛主要靠进口。

表1是用于微型变压吸附制氧的两种进口分子筛的主要参数表。由该表可知,在1个大气压下,FZS2的氮气静态吸附量是FZS1的2.375倍,FZS2对N₂/O₂的选择性约为FZS1的2倍,同时,FZS2的吸附压力低于FZS1的吸附压力。因此采用新型高效的锂分子筛是变压吸附制氧微型化的必然选择,而进口锂分子筛昂贵的价格成为其应用的一大障碍,因此,研制适用于微型变压吸附制氧的新型高效分子筛,是促进我国微型变压吸附制氧机快速发展的重要保证。

表1 分子筛性能参数表

分子筛名称	FZS1	FZS2
组成	13 X 型钠/钙硅酸盐医用沸石	13LiX 型锂及稀土硅酸盐医用沸石
吸附压力绝对值	0.27 MPa	0.24 MPa
氮气静态吸附 ^①	>8.0 NL/kg	>19 NL/kg
N ₂ /O ₂ 选择性 ^②	3.1 ± 0.2	>6
颗粒尺寸/mm	0.63 ± 0.07	0.61 ~ 0.65
堆积密度/kg/L	0.61 ± 0.02	0.65 ~ 0.7

注:①、②均是指压力为0.1 MPa、温度为25℃的情况下。

3.3 开发节能工艺流程

变压吸附制氧工艺主要有高压吸附、常压解吸的PSA流程,加压吸附、真空解吸的VPSA流程,以及常压吸附、真空解吸的VSA流程。其中,PSA流程的设备少,初投资低,因此广泛应用于小规模场合。而VPSA和VSA工艺的设备较多,能耗较低,适用于大规模的装置。微型变压吸附制氧装

置的体积小,产氧量小,因此主要采用PSA工艺。同时,由于VPSA的能耗低,因此也被引入微型变压吸附制氧的研究中。尽管美国在上世纪80年代就有VPSA工艺的微型制氧机上市^[7],但国内的微型VPSA工艺还处于研究阶段^[8]。

对于微型变压吸附制氧技术,降低系统的能耗就可以降低压缩机的功率,从而减小体积,减轻重量。提高氧气回收率是降低制氧能耗的重要途径,是变压吸附制氧工艺的研究重点,近年来为提高回收率而对工艺的改进主要有:采用同时进行的步骤(使床层再生过程的某些步骤同时进行,如已完成吸附的床与已完成再生的床在产品端和进气端同时进行均压,充压时在床层两端同时充压,以及均压和逆放、均压和顺放同时进行等),增加均压过程、用纯度高的气体进行清洗,脉冲PSA工艺等^[6],其中,适用于微型变压吸附制氧工艺的是均压过程。R Banerjee等人^[9]利用焓分析的方法研究了无均压步骤和有均压步骤的PSA过程。研究发现,在其研究条件下,有均压步骤流程的最佳切换压力、压缩机功损、床层功损、有效能效率、产品回收率分别是无均压步骤的0.25倍、0.24倍、0.16倍、2.82倍和2.06倍。说明增加均压步骤可以有效降低能耗,减小空氧比,提高回收率,进而减小压缩机功率,减少分子筛用量,从而减小制氧机的体积与重量。

带均压步骤的微型变压吸附制氧工艺主要有吸附器进气端均压和吸附器两端均压两种,图3是在三种工艺条件下的氧气浓度和回收率变化曲线。由该图可以看出,增加进气均压步骤,氧气浓度和回收率的增加比较显著,而工艺从进气均压到两端均压氧气浓度和回收率也明显增加,但没有增加一次均压的变化明显。两端均压工艺需要在吸附器出气端增加一个均压阀,既增加了成本,又增加了故障点,因此,在设备对回收率要求不太高的情况下,一般采用吸附器进气端均压工艺。笔者通过实验得出微型制氧机宜采用非完全均压工艺的结论^[10],这与Heung^[11]等人的研究结果是一致的。

图4给出了一个循环周期无均压流程和进气均压流程在相同切换压力下吸附器进口压力变化曲线。由图4可知,在压力上升初期,有均压工艺的压力上升较快,且在升压吸附阶段(F-G)的压力要高于无均压流程,因此,有均压工艺在整个过程中的平均压力较高,同时均压工艺的循环周期较短,相同时间内分子筛的循环次数较多,这些都提

高了吸附分离的效果^[12]。

对于微型变压吸附制氧, 另外一个降低能耗的一个有效措施是降低系统的切换压力(吸附循环切换时的吸附压力)。降低切换压力, 可以降低压缩机的发热量, 降低压缩机的噪声, 降低压缩机的能耗, 提高压缩机的排气量以及延长制氧机中许多部件的寿命。因此, 降低切换压力, 使制氧机在低压下吸附分离的低压分离工艺是一种先进的工艺。图5是不同的反吹阻力情况下氧气浓度随切换压力的变压曲线。由该图可知, 通过改变反吹阻力可以降低最佳切换压力, 而对应的最佳氧气浓度变化不大。目前, 采用国产分子筛, 已经可以将切换压力降至0.15MPa(表压)以下。

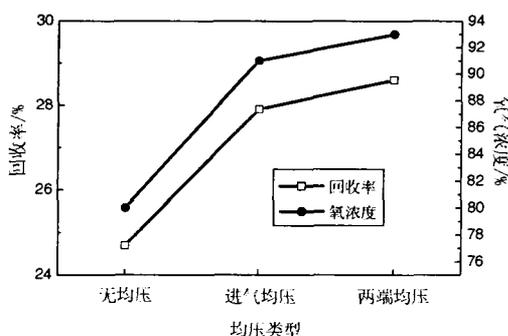


图3 工艺流程对氧气浓度和回收率的影响

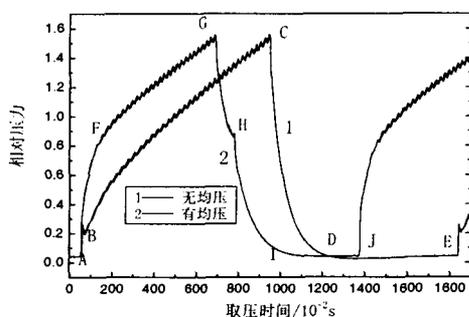


图4 一个循环周期内两种工艺的吸附器进口压力变化曲线

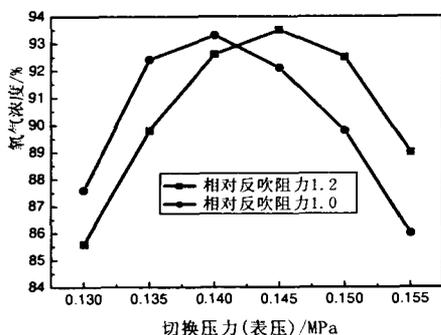


图5 反吹阻力对最佳切换压力的影响

3.4 优化吸附器结构

吸附器是微型变压吸附制氧机的关键部件, 在进行吸附器结构设计时, 要保证高效和长寿两大目标。高效性主要是指吸附器的死空间小, 壁面效应低, 布气效果好; 长寿主要是指吸附器的压紧结构保证分子筛不上下浮动以避免分子筛的磨损^[13], 并且合理地除去空气中的水分, 以保证分子筛长期高效运行而不失效。要实现这两大目标主要从优化吸附器两端空间的体积, 优化吸附器进气端的分流效果, 优化分子筛压紧装置, 增加减小壁面效应措施等方面对吸附器结构进行优化与改进。

微型变压吸附制氧的吸附器由三个分流板分成进口空间、干燥剂、分子筛和出口空间四个部分, 其中, 进出口空间的大小对制氧效果有很大的影响。通过对吸附器的装填结构进行正交实验^[14], 发现吸附器两端空间对氧气浓度影响的显著性顺序为氧气产量 > 出口空间 > 进口空间 > 吸附周期, 在吸附器两端空间的体积增加到原来的1.75倍和2.5倍, 分子筛减少9.1%和18.2%的情况下, 氧气浓度仍可以达到92%以上。因此, 进一步研究吸附器的装填结构, 可以优化分离效果, 减小制氧机的体积。

微型变压吸附制氧的循环周期较短, 属于快速PSA工艺, 因此, 改善吸附器进口处的气流分布, 可以提高吸附器内气流速度径向的均匀性, 从而改善浓度波的移动过程, 进而提高分离效果。固定床流场的计算机模拟结果显示^[15-16], 在吸附器的进口空间内, 由于流场的突扩, 会形成中心和两侧速度较大的两个回流区, 流体的中心流速与两侧相差较大, 流场的分布非常不均匀。因此, 采用普通等孔径均匀分布的气流分布器不能很好地解决气流分布不均的问题。由于气流中间速度大, 两侧速度小, 因此, 将普通的气流分布器改为中间孔径小、外侧孔径逐渐增大的非均匀型气流分布器可以起到较好的布气效果。另外, 将吸附器的端盖进行改进, 使端盖进入全部的进出口空间, 直接与气流分布器接触, 并将端盖内的气流通道在进出口空间处做成流线的渐扩型。这样可以减小气体的回流区, 减小气流突扩的影响, 并减小排气时的阻力和吸附器两端死空间的体积, 从而提高分离效果。

对于固定床吸附器, 近壁区比中心区具有更高的孔隙率, 使近壁气流通过量比同一截面上中心区部分大得多, 造成了近壁区吸附床提前穿透。一般而言, 设备越小, 壁面效应越明显^[17-18], 因此,

变压吸附制氧微型化后要尽量减小壁面效应。研究表明^[18],固定床越长,轴向及径向混合越充分,可以在一定程度上减小壁面效应,因此,对于微型变压吸附制氧要适当增加高径比,一般高径比为3~8,高径比过大会使分子筛流化,气体的空塔流速一般控制在流化速度极限值的70%左右^[19-20]。另外,在吸附器内壁加圆环,使气流流过壁面时受阻而做曲线运动,可以增加吸附床内气流的径向混合,从而减弱壁面效应。

目前微型变压吸附制氧吸附器的压紧方法主要有中柱螺母固定和弹簧压紧固定两种。对于弹簧压紧固定,端盖的进气口在中间,有利于改善气流的均布,并可以提高吸附器的装填密度,减少分子筛的粉化。

微型变压吸附制氧机的除水问题始终没有得到根本解决,而饱和析出的水被吸附后又不能彻底解吸,因此,吸附器进口端的分子筛易失效,国产制氧机的寿命还比较低^[21]。同时,由于壁面效应和气流分布不均等原因,吸附器出口端有一段分子筛利用率较低。针对吸附器两端分子筛的特殊性,对于采用锂分子筛的制氧机,为了降低成本,充分发挥锂分子筛的使用效率,分子筛吸附床可以分层装填。将锂分子筛装在中间,价格低的普通分子筛装在两端。国外曾有分层装填吸附剂制取高纯度氧的装置^[2]。

此外,还可以采用套筒式吸附器、多吸附柱并联的吸附器等形式来优化分离效果,减小制氧机体积^[1]。

3.5 优化制氧机结构与外观

目前,国内生产的微型变压吸附制氧机的结构变化不大,外观也缺乏创新。

微型变压吸附制氧机的结构设计基本上还是先做样机,然后再画其结构图和零部件图的方法,没有实现计算机辅助结构设计。因此,设计周期较长,不便修改,且在设计时都是参照现有的机型,结构上缺乏创新。而采用计算机辅助设计的方法,不必做样机就可以看到其三维效果,且便于调整各部件的位置关系,从而缩短产品开发周期。

由于微型变压吸附制氧机开始时主要用于医疗,尽管目前正在向家电产品转化,制氧机的外形仍然沿用长方体的形式,外观上基本没有太大变化,缺乏家电产品应有的多变的外观形状、流线型设计理念,以及形象型、拟物的造型设计思维。不过,目前已经有制氧机厂家开始注意这个问题,并

正在开发具有流线型外观、结构更加小巧的制氧机产品,不久的将来就可以投放市场。

3.6 其他

微型变压吸附制氧机的主要用途有两个:氧疗和氧保健。用于氧疗时氧气浓度要求较高,我国医用氧标准规定氧气浓度必须大于等于90%^[22]。而用于氧保健时氧气浓度并不需要太高,研究结果显示,对于运动后的疲劳恢复来说,60%的氧浓度较为适宜^[23]。用于氧保健的膜制氧机的氧浓度在40%,在降低产品气浓度后,氧的产量将大大降低,因此分子筛的用量和压缩机的功率都将减小,制氧机的体积和重量将大为减小。在日本,微型制氧机的氧保健市场占有很大的比例,随着我国微型制氧机市场的逐步成熟,氧保健市场所占比例将会不断增加,因此,开发保健型的制氧机以减小体积,达到微型化以实现便携目的将会有很好的市场前景。

同时,对于变压吸附制氧机,氧流量减小时氧气浓度将会升高,因此,对于保健型制氧机,在降低氧流量时其浓度仍可以达到90%以上,此时配以节氧器,实现脉冲式供氧,氧流量相当于提高了一倍,仍可以作为氧疗使用。

另外,可以将氧疗保健与其他产品结合,以增加制氧机的功能,使其更具人性化。曾有人将音频装置引入吸氧系统,边吸氧,边听音乐;也有人在制氧机中加入香料,使吸入的氧气具有香味,给人以嗅觉的享受;还有人将制氧机与按摩椅组合在一起^[23]。

4 小结

近年来微型变压吸附制氧技术发展很快,尤其是在低压下压缩机的排气量得到了很大的提高,并且新型锂分子筛的应用,新的节能工艺的研究开发为制氧机的微型化提供了强有力的保障。然而,微型变压吸附制氧机产业正处于发展期,制氧机的配件缺乏统一的标准与规范,外观设计缺乏创新理念。因此,对变压吸附空分制氧的微型化技术还需要深入的研究,还需要借鉴国外产品以及其它家电产品的成功开发经验与先进设计理念。

参考文献:

- [1] 卜令兵. 小型变压吸附制氧技术实验研究与PSA-DES软件开发[D]. 北京:北京科技大学硕士学位论文,

- 2006.
- [2] 顾飞龙. 变压吸附空气分离技术的开发与应用 [J]. 化工装备技术, 1999, 20(1): 47-51.
- [3] 宋伟杰, 张永春, 张 建. 变压吸附空分富氧吸附剂进展 [J]. 低温与特气, 2001, 19(1): 1-4.
- [4] 耿云峰, 耿晨霞, 张文效. 变压吸附 (PSA) 空分制氧技术进展 [J]. 煤化工, 2003, (1): 33-36.
- [5] 赵洪法. 变压吸附吸附剂的研究进展 [C] // 变压吸附设备技术交流论文集. 承德: 中国通用机械气体分离设备行业协会, 2004: 3-6.
- [6] 李 杰, 周 理. 变压吸附空分制氧技术的进展 [J]. 化学工业与工程, 2004, 21(3): 201-205.
- [7] 汤西林. 美国 ROOMATE 分子筛制氧机简介 [J]. 深冷技术, 1985, (3): 16-18.
- [8] 赵 华. 微型真空变压吸附制氧技术实验研究 [D]. 北京: 北京科技大学硕士学位论文, 2006.
- [9] 陈健译, 郜豫川校. 等. 变压吸附空气分离过程的 Yong 分析 [J]. 低温与特气, 1994, (3): 7-14.
- [10] 卜令兵, 刘应书, 刘文海, 等. 微型变压吸附空气分离制氧均压过程实验研究 [J]. 北京科技大学学报, 2006.
- [11] HEUNG S Sh, DONG H K. Performance of a two-bed pressure swing adsorption process with incomplete pressure equalization [J]. Adsorption, 2000, (6): 233.
- [12] 卜令兵, 刘应书, 刘文海等. 微型变压吸附制氧压力研究 [J]. 化工进展, 2006, (5): 572-575.
- [13] 范志涛. 吸附剂粉化的原因分析和控制 [J]. 低温与特气, 2005, 23(3): 18-20.
- [14] 赵 治. 微型变压吸附制氧工艺研究 [D]. 北京: 北京科技大学硕士学位论文, 2005.
- [15] 田津津, 张玉文, 王 锐. 变压吸附系统气流分布器结构的数值模拟及分析 [J]. 低温工程, 2005, (4): 45-48.
- [16] 钟思青, 陈庆龄, 陈志强, 等. 轴向流固定床内流场的数值模拟与实验验证 [J]. 化工学报, 2005, 56(4): 632-636.
- [17] 宁 平, 谷俊杰, BART H J, 等. 边流效应对固定吸附器穿透曲线的影响 [J]. 化工学报, 1998, 49(6): 678-682.
- [18] 宁 平, 陈亚雄, 谷俊杰, 等. 边流效应对固定床吸附容量的影响 [J]. 环境科学, 1998, 19(5): 69-71.
- [19] 杜 钢, 曹玉库. 医用分子筛制氧设备性能优化设计试验 [J]. 舰船防化, 2005, (3): 23-27.
- [20] 朱学军, 郭 彤. 两床变压吸附制氧工艺的研究 [J]. 低温与特气, 2001, 19(1): 18-21.
- [21] 陈逸樵. PSA 制氧机用空压机的选型与设计 [J]. 深冷技术, 2002, (1): 15-16.
- [22] YY/T 0298—1998. 医用分子筛制氧设备通用技术规范 [S].
- [23] 陈 勇, 王从厚, 吴 鸣, 等. 气体膜分离技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

作者简介:

卜令兵 (1978-), 男, 北京科技大学热能系硕士研究生, 主要研究方向: 变压吸附气体分离技术. E-mail: blb_ustb@sohu.com.

我国首台激光气溶胶双级飞行时间质谱仪亮相

在日前举行的“国家科技创新重大成就展”上, 中科院大连化学物理研究所李海洋研究员领导的课题组研制成功的“863”课题“大气细粒子连续监测技术与设备项目”的核心仪器——激光气溶胶双级飞行时间质谱仪一亮相就获得业内专家的肯定, 并被香港风险投资专家所青睐, 成为参展项目中的“亮点”之一。该仪器主要用于空气质量实时监测和环境污染过程动态分析以及实时分析等领域。

该仪器具有自主知识产权, 价格大大低于国外同类仪器。值得一提的是他们掌握了该领域内的核心技术, 打破了国外对该类仪器的技术垄断。

气溶胶广泛存在于环境当中, 与人们的生活和健康息息相关。该仪器可以实时监测大气中 0.5 ~ 10 μm 的气溶胶

粒子的粒径分布, 并同时测量细粒子中的硝酸盐、硫酸盐、铵盐、地壳元素、重金属粒子等基本化学组分。与目前国内常用的离线气溶胶分析技术相比, 该仪器克服了离线技术测量过程中分析时间长、在分析过程中粒子会发生物理化学性质变化的局限性, 具有分析速度快、可以进行现场实时多组分同时分析、揭示气溶胶的瞬间变化等优点。

据了解, 目前国内外使用的气溶胶测量装置主要是一些离线的测量技术, 如计尘器、冲击式采样器、沉淀器、浊度仪等。国外从 20 世纪 70 年代开始发展在线气溶胶测量技术, 2000 年开始有商品仪器出售。

林 刚